

Wybrane problemy inżynierii i diagnostyki wysokonapięciowej we współczesnej elektroenergetyce

Marek Florkowski , Jakub Furgał , Paweł Zydroń ,
Maciej Kuniewski , Piotr Pająk , Józef Roehrich ,
Michał Bonk , Paweł Mikrut 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

Streszczenie: Zapewnienie ciągłości dostaw energii elektrycznej, będącej obecnie główną, bardzo wygodną w stosowaniu formą energii, jest podstawowym zadaniem elektroenergetyki. Zasadnicze znaczenie dla przesyłu, dystrybucji i przetwarzania energii elektrycznej ma niezawodność pracy urządzeń elektrycznych. Problematyka badań prowadzonych przez Zespół Inżynierii Wysokich Napięć obejmuje szeroki zakres zagadnień współczesnej elektroenergetyki: metody oceny stanu urządzeń wysokonapięciowych, w tym przede wszystkim ich układów izolacyjnych; badania mechanizmów powstawania i rozwoju wyładowań niezupełnych w dielektrykach; identyfikację przyczyn i skutków narażeń eksploatacyjnych; analizę przepięć w sieciach elektroenergetycznych, w tym wywołanych wyładowaniami piorunowymi.

Słowa kluczowe: inżynieria wysokich napięć, dielektryki, izolacja elektryczna, narażenia eksploatacyjne, diagnostyka, przepięcia, wyładowania piorunowe, ochrona przepięciowa

SELECTED PROBLEMS OF HV ENGINEERING AND DIAGNOSTICS IN MODERN ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Abstract: Guaranteeing the continuity of electricity supply, which is currently the main and very convenient form of energy, is the basic task of the power industry. The operational reliability of electrical devices is essential for the transmission, distribution and conversion of electricity. The issues of research carried out by the High Voltage Engineering Team cover a wide range of modern power engineering issues: methods of assessing the condition of HV devices, primarily their insulation systems; research on the mechanisms of inception and the development of partial discharges in dielectrics; identification of the causes and effects of operational stresses; analysis of overvoltages in power networks, including those caused by lightning.

Keywords: high voltage engineering, dielectrics, electrical insulation, operational stresses, diagnostics, overvoltage, lightning, overvoltage protection

https://doi.org/10.7494/978-83-66727-89-2_4

1. Wprowadzenie

Energia elektryczna jest obecnie główną, bardzo wygodną w stosowaniu, formą energii. Światowe trendy dotyczące zwiększania udziału energii z odnawialnych źródeł w ogólnym bilansie energetycznym jeszcze tę pozycję umacniają. Obserwowany jest także wzrost udziału urządzeń zasilanych energią elektryczną w segmencie elektromobilności. Niezawodność pracy urządzeń elektrycznych na poziomach wysokiego i średniego napięcia ma kluczowe znaczenie dla przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Dotyczy to takich obiektów, jak: generatory, transformatory, linie napowietrzne i kablowe, rozdzielnie z izolacją gazową SF₆, izolatory, przekształtniki, silniki i inne. Podwyższanie wartości napięć znamionowych w elektroenergetyce, a więc w efekcie wartości natężenia pola elektrycznego, powoduje konieczność stosowania odpowiednich układów izolacyjnych.

Inżynieria i diagnostyka wysokonapięciowa mają zasadniczy wpływ na rozwój współczesnej elektroenergetyki, w szczególności układów izolacyjnych zawierających materiały dielektryczne stałe, ciekłe i gazowe. Ze względu na wymagania dotyczące wytrzymałości elektrycznej w warunkach roboczych i zakłóceńowych, które powinny spełniać wysokonapięciowe układy izolacyjne, zagadnienia te odnoszą się do zjawisk fizycznych w strukturach dielektryków, w silnym polu elektrycznym oraz skutków ich działania w określonym czasie, przy napięciach stałych DC, przemiennych AC i impulsowych.

Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH ma 70-letnią tradycję prowadzenia badań w różnych obszarach elektroenergetyki oraz współpracy z przemysłem i ośrodkami naukowo-badawczymi, krajowymi i zagranicznymi. Badania eksperymentalne prowadzone przez Zespół Inżynierii Wysokich Napięć (IWN) są realizowane w Laboratorium Wysokich Napięć wyposażonym w liczne, specjalistyczne stanowiska badawcze i pola probiercze (Florkowska i Furgał 2017, Florkowska i in. 2020).

2. Przegląd tematyki badawczej Zespołu Inżynierii Wysokich Napięć

Problematyka badań prowadzonych przez Zespół IWN obejmuje zagadnienia z zakresu elektroenergetyki ze szczególnym uwzględnieniem diagnostyki izolacji wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych, badań materiałów dielektrycznych do konstrukcji tych urządzeń na różnych poziomach napięciowych oraz przyczyn i skutków narażeń eksploatacyjnych. Diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia jest dziedziną mającą na celu ocenę ich stanu na etapie projektowania, podczas produkcyjnych procesów technologicznych i prób odbiorczych, a następnie na kolejnych etapach eksploatacji (Florkowska 2016). Narażenia eksploatacyjne powodowane działaniem roboczego pola elektrycznego, przepięć oraz narażeń cieplnych i mechanicznych są przyczyną procesów degradacji w strukturach materiałów izolacyjnych, ograniczających niezawodność obiektów w systemie elektroenergetycznym. Diagno-

styka wysokonapięciowa obejmuje swym zakresem również obszerną grupę badań materiałów elektroizolacyjnych, szczególnie polimerów syntetycznych o odpowiednich właściwościach fizykochemicznych i elektrycznych. Niezawodna praca wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych zależy głównie od stanu technicznego ich układów izolacyjnych, a ich ocena jest istotnym elementem stosowanych strategii eksploatacji majątku sieciowego.

Zakres badań prowadzonych przez Zespół IWN obejmuje analizy teoretyczne i badania eksperymentalne w następujących grupach zagadnień:

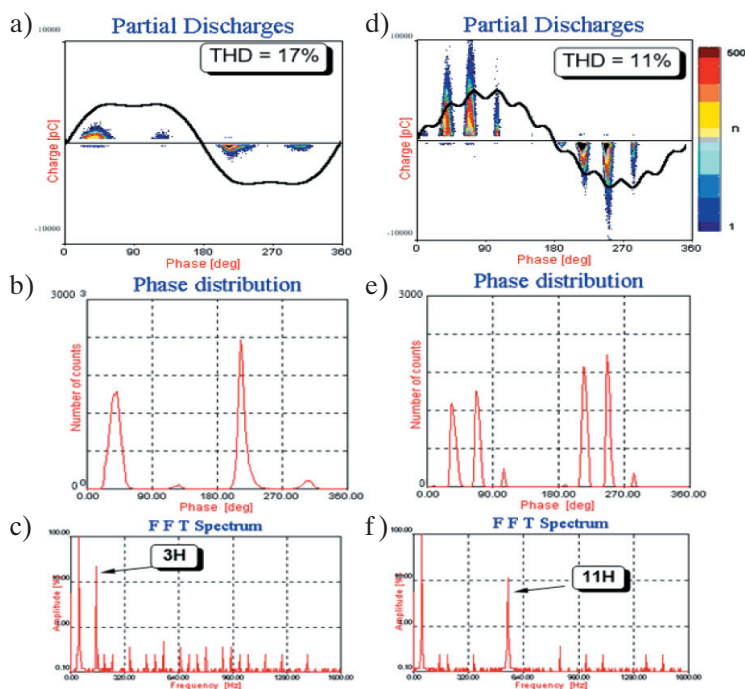
- charakterystyka właściwości materiałów dielektrycznych oraz ocena stanu układów izolacyjnych z zastosowaniem metod służących badaniu odpowiedzi dielektrycznej (w dziedzinie czasu i częstotliwości) oraz metod detekcji i analizy wyładowań niezupełnych (WNZ), w celu wykrycia ich źródeł, w tym również na potrzeby diagnostyki technicznej i monitoringu;
- badania mechanizmów powstawania i działania WNZ w dielektrykach oraz ich wpływu na rozwój degradacji materiałów stosowanych w układach izolacyjnych;
- metody identyfikacji skutków narażeń eksploatacyjnych w transformatorach i maszynach elektrycznych, w szczególności wykrywanie i rozpoznawanie odkształceń i przemieszczeń uzwojeń, z zastosowaniem analizy odpowiedzi częstotliwościowej i funkcji przenoszenia;
- analizy przepięć w układach elektroenergetycznych, w szczególności ich przyczyn, propagacji oraz metod ograniczania.

Jednym z najważniejszych obecnie narzędzi oceny jakości izolacji wysokiego napięcia jest pomiar wyładowań niezupełnych. Wady układów izolacyjnych mogą mieć podłoże technologiczne lub eksploatacyjne. Wyładowania niezupełne są zwykle wynikiem długotrwałych, złożonych narażeń elektrycznych, termicznych i mechanicznych, które mogą prowadzić do degradacji izolacji. Konieczne staje się wówczas prowadzenie prac nad metodami badań diagnostycznych oraz procesów przemian w strukturach dielektryków. Kilkadziesiąt lat doświadczeń Zespołu IWN, obejmujących problematykę WNZ, dotyczy metod pomiarowych, badań zjawisk fizykalnych w dielektrykach, analiz teoretycznych, w tym również z obszaru teorii przetwarzania sygnałów, a także analityki i algorytmów sztucznej inteligencji w zastosowaniach diagnostycznych (Florkowska 1967, Florkowska i in. 1975, 2001, Florkowski 2020a, Włodek 1992, Zydrón 2011). Należy przy tym zaznaczyć, że detekcja, rejestracja, monitoring i analiza WNZ są obecnie jednymi z głównych tematów prac w obszarze diagnostyki wysokonapięciowych układów izolacyjnych.

W zakresie metod pomiarowych należy podkreślić wkład Zespołu w rozwój nowatorskiej fazowo-rozdzielczej metody akwizycji impulsów wyładowań niezupełnych w czasie rzeczywistym PRPDA (*Phase-Resolved Partial Discharge Analysis*) (Florkowska 1997, Florkowska i in. 2001, Florkowski 2020a). Nowe możliwości identyfikacji WNZ w defektach struktury dielektryków daje też oryginalna metoda „napięcia

przerywanego” CPD (*Chopped Partial Discharges*), umożliwiającą poszerzenie analizy mechanizmów wyładowań niezupełnych o dynamikę zjawisk w układach izolacyjnych, w szczególności przez uwzględnienie neutralizacji ładunków powierzchniowych w wewnętrznych inkluzjach gazowych oraz badania czasu opóźnienia zapłonu wyładowań (Florkowski i in. 2015a, 2017). Metoda napięcia przerywanego CPD wraz z zaobserwowanym efektem „echa” (*partial discharges echo*) stwarza nowe możliwości diagnostyczne w zakresie metodologii i interpretacji mechanizmów fizykalnych powstawania WNZ oraz procesów degradacji (Florkowski i in. 2015a, 2016a).

Efektom prac o szczególnym znaczeniu dla metodologii pomiarów wyładowań niezupełnych jest rozpoznanie wpływu zawartości wyższych harmonicznnych w wysokim napięciu zasilającym badany obiekt na struktury obrazów WNZ i wartości opisujących je parametrów (rys. 1). Stwierdzenie powyższe jest podstawą poprawnej interpretacji wyników badań WNZ i oceny stanu badanego obiektu (Florkowski 2020a, Florkowski i in. 2013, 2020a).

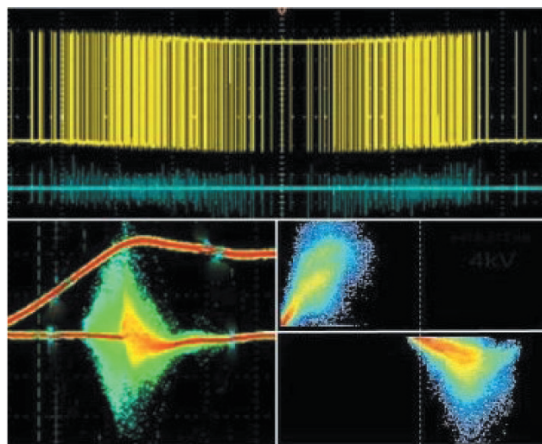


Rys. 1. Obrazy wyładowań niezupełnych rejestrowane w obecności 3. harmonicznej w wysokim napięciu na poziomie THD = 17% (lewa kolumna): a) obraz fazowo rozdzielczy; b) rozkład fazowy $N(\varphi)$; c) widmo wysokiego napięcia ze składową 150 Hz; obrazy wyładowań niezupełnych rejestrowane w obecności 11. harmonicznej w wysokim napięciu na poziomie THD = 11% (prawa kolumna): d) obraz fazowo rozdzielczy; e) rozkład fazowy $N(\varphi)$; f) widmo wysokiego napięcia ze składową 550 Hz

Źródło: Florkowski (2020a)

W analizie wpływu zakłóceń zewnętrznych na obrazy fazowo-rozdzielcze wyładowań niepełnych wprowadzono algorytmy odszumiania falkowego weryfikowane w pomiarach na przemysłowych urządzeniach elektrycznych (Florkowski i Florkowska 2007).

Odrębny obszar badań prowadzonych przez Zespół IWN stanowi detekcja i analiza wyładowań niepełnych przy wymuszeniach niesinusoidalnych takich jak napięcia o modulowanej szerokości impulsów PWM (*Pulse Width Modulation*) oraz udary napięciowe, a także przy napięciu stałym DC. Szczególnie aktualny jest problem powstawania WNZ w układach izolacyjnych urządzeń elektrycznych zasilanych z falowników (rys. 2). Wyniki prac Zespołu IWN prowadzonych podczas projektu badawczego finansowanego przez NCN przedstawiono w książce i serii artykułów (Florkowska i in. 2011, 2012a).



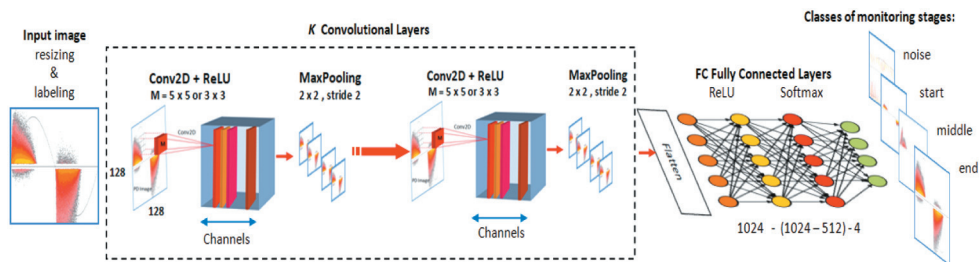
Rys. 2. Rejestracja wyładowań niepełnych w systemach zasilanych wymuszeniami PWM
Źródło: Florkowska i in. (2012a)

W układach izolacyjnych urządzeń elektrycznych pracujących przy napięciu stałym wraz ze wzrostem wartości napięć znamionowych oraz natężeń roboczych pola E rośnie również zagrożenie wystąpienia przebiecia elektrycznego, inicjowanego w lokalnych źródłach wyładowań niepełnych. Z tego względu szczególnego znaczenia nabrały prace nad opisem fizycznym mechanizmu wyładowań przy tym napięciu. Efektem prac prowadzonych w tym zakresie jest propozycja modelu tego mechanizmu bazująca na rezystancyjno-pojemnościowym schemacie zastępczym układu izolacyjnego ze źródłem wyładowań (Florkowski 2020b).

Aktualnym obecnie kierunkiem naukowym są prace dotyczące zastosowania sztucznej inteligencji w autonomicznej diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Ich efektem była adaptacja algorytmów uczenia maszynowego do rozpoznawania form wyładowań elektrycznych na podstawie ich obrazów fazowo-rozdzielczych.

Do rozpoznawania form wyładowań użyto głębokich sieci konwolucyjnych (rys. 3). Nowatorskim kierunkiem jest również zastosowanie algorytmów przepływowo-optycznych do rozpoznania przemieszczeń klastrów w obrazach wyładowań. Metody powyższe mają zasadnicze znaczenie dla przyszłych autonomicznych systemów diagnostyczno-monitoringowych (Florkowski 2020a, 2020c, 2021a).

Badania mechanizmów fizykalnych inicjowania i rozwoju WNZ w układach izolacyjnych obejmują prace, których celem jest ocena skutków energetycznego oddziaływania wyładowań w defektach struktury wysokonapięciowych dielektryków, w szczególności w polimerach syntetycznych. W tym kontekście należy podkreślić m.in. rozpoznanie efektu migracji atomów metali w silnym polu elektrycznym, zbliżonego do mechanizmu drzewienia elektrycznego (Florkowska i in. 2012b, Florkowski i in. 2015b), oraz opracowaną metodę oceny zmian powierzchniowej struktury dielektryka na podstawie punktowych pomiarów rezystywności powierzchniowej, umożliwiającą utworzenie „mapy erozji powierzchni” (Florkowski i in. 2018).



Rys. 3. Przykład architektury konwolucyjnej sieci neuronowej do rozpoznawania form wyładowań niezupełnych na podstawie obrazów fazowo-rozdzielczych

Źródło: Florkowski (2020a)

Jednym z ważnych zagadnień badawczych jest problem energetycznego oddziaływania impulsów WNZ na struktury materiałów dielektrycznych. Z tego powodu proponowano i zastosowano w badaniach procesów degradacji izolacji żywicznej i silikonowej metodę rozszerzonych obrazów fazowo-rozdzielczych umożliwiającą analizę struktur rozkładów energii rejestrowanych zbiorów impulsów WNZ (Zydroń 2011, Zydroń i in. 2018, 2019).

Prace nad metodą korelacji obrazów fazowo-rozdzielczych WNZ z obrazowaniem optycznym pozwoliły na powiązanie etapów rozwoju wyładowań przy niejednostajnym rozkładzie pola elektrycznego z barierą dielektryczną z ich formami. Umożliwiło to wyróżnienie wskaźników opisujących profil wyładowania (Florkowski i in. 2020c). Podejście to umożliwia także badania oraz weryfikację symulacyjną mechanizmów strimerowych w konfiguracjach z powierzchnią dielektryczną (Florkowski 2021b). Prowadzono także badania form WNZ przy napięciu stałym i podwyższonym ciśnieniu (Florkowski 2020b, Florkowski i in. 2016b).

Izolacja wysokiego napięcia DC odgrywa ważną rolę, zwłaszcza w systemach przesyłu energii elektrycznej (HVDC), ale także coraz częściej na poziomie średniego napięcia (MVDC). Występowanie ładunku przestrzennego przy napięciu stałym ma istotne znaczenie dla niezawodności izolacji elektrycznej. Prowadzone w tym zakresie eksperymenty obejmują badania ładunku przestrzennego w materiałach dielektrycznych impulsową metodą elektroakustyczną PEA (*Pulsed Electro-Acoustic*) (Florkowski i Kuniewski 2022).

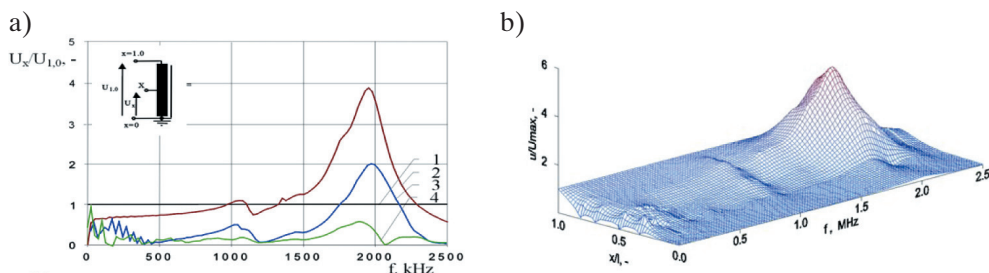
Perspektywiczne kierunki prac w zakresie diagnostyki wysokonapięciowej na podstawie wyładowań niezupełnych dotyczą rozszerzenia możliwości pomiarowych i interpretacyjnych metody napięcia przerywanego CPD, pomiarów przy napięciu stałym w połączeniu z impulsową metodą elektroakustyczną PEA oraz wprowadzania elementów sztucznej inteligencji. W zakresie badań mechanizmów fizykalnych są to efekty migracji atomowej, diagnostyka oparta na mapach erozji powierzchniowej oraz modelowanie efektów strimerowych.

Inną grupą zagadnień realizowanych w Zespole IWN są badania integralności uzwojeń transformatorów i maszyn elektrycznych. Transformatory energetyczne są jednymi z kluczowych elementów systemów energetycznych – zarówno przesyłowych, jak i rozdzielczych. Dotyczy to aspektów niezawodności i bezpieczeństwa energetycznego. W obszarze tym Zespół IWN ma bogate doświadczenia w badaniach integralności uzwojeń transformatorów metodami analizy odpowiedzi częstotliwościowej i funkcji przenoszenia. Prace w tej dziedzinie dotyczyły bezinwazyjnej identyfikacji zniekształceń i uszkodzeń występujących w uzwojeniach, powstałych pod wpływem narażeń eksploatacyjnych, w tym na skutek działania dynamicznego prądów zwarciovych. Właściwości izolacji elektrycznej oraz stan techniczny uzwojeń decydują o czasie niezawodnej pracy transformatorów. Etapy badań zawierały modelowanie, opracowanie aparatury pomiarowej (*Sweep Frequency Response Analyzer*) wraz z oprogramowaniem, wykonanie analiz i pomiarów laboratoryjnych z zastosowaniem modelowych konstrukcji uzwojeń oraz ich weryfikacje na obiektach rzeczywistych. Badania porównawcze prowadzone w szerokim zakresie częstotliwości (od 100 Hz do 5 MHz) umożliwiły opracowanie metody identyfikacji deformacji uzwojeń transformatorów. Do detekcji zniekształceń uzwojeń stosowano zwykle pomiar indukcyjności rozproszenia, wykonywany jedynie przy częstotliwości sieciowej. Stan techniczny uzwojeń jest sprawdzany także podczas inspekcji transformatorów, jednak jest to związane z uciążliwymi i kosztownymi pracami demontażowymi. Z tego powodu aktywnie rozwijane są w wielu ośrodkach krajowych i zagranicznych prace nad metodami bezinwazyjnymi, umożliwiającymi wykrywanie zniekształceń uzwojeń. Metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej, oparta na pomiarach funkcji przenoszenia oraz szerokopasmowej admitancji uzwojeń, jest szczególnie obiecująca i doskonała. Wnioskowanie wynika z faktu, że odmienne kształty rejestrowanych przebiegów, w różnych zakresach częstotliwości

i różnym okresie eksploatacji, świadczą o zniekształceniach uzwojeń. W wyniku badań opracowano metodę identyfikacji niektórych rodzajów deformacji wybranych uzwojeń transformatorów. Analizowano również wpływ elementów konstrukcyjnych transformatora oraz parametrów sygnałów pobudzających na uzyskiwane wyniki pomiarów. Wykrywanie zniekształceń i uszkodzeń uzwojeń transformatorów ma szczególne znaczenie dla ich niezawodnej eksploatacji, z czego wynika potrzeba doskonalenia stosowanych metod diagnostycznych. Wyniki badań prowadzonych w Zespole IWN zostały przedstawione w licznych artykułach (Florkowski i Furgał 2003, 2004, Kuniewski 2020) oraz zebrane i szerzej opisane w książce (Florkowski i Furgał 2013).

Bogate tradycje badań w Katedrze dotyczą problematyki przebiegów w układach elektroenergetycznych, w szczególności ich powstawania, propagacji i metod ograniczania (Furgał 2003, 2009, Furgał i in. 2020). Przepięcia generowane w sieciach elektroenergetycznych i instalacjach przemysłowych są jednymi z głównych narażeń układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. Ich źródłami są głównie wyładowania atmosferyczne (Flisowski i in. 2002, Furgał 2020) oraz planowe i awaryjne rekonfiguracje sieci, implikujące dokonywanie operacji łączeniowych. W odniesieniu do tych ostatnich analizowano przepięcia generowane przez wyłączniki próżniowe oraz ich wpływ na układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych (Florkowski i in. 2012, 2020b).

W dziedzinie propagacji przebiegów w transformatorach prowadzono liczne prace dotyczące zarówno przebiegów w pojedynczym uzwojeniu, jak i przebiegów przenoszonych w zależności od typu rdzenia transformatora (ze stali krzemowej, rdzeń amorficzny), przy uwzględnieniu wpływu stromości uderzeń napięciowych. Analizowano wpływ częstotliwości składowych przejściowych przebiegów zewnętrznych na przepięcia w transformatorach. Wykazano, że przepięcia mogą być silnie wzmacniane wewnątrz uzwojeń transformatorów energetycznych z powodu zjawisk rezonansowych, jeśli częstotliwości przebiegów zewnętrznych są równe częstotliwościom własnym transformatorów (rys. 4).



Rys. 4. Zależność częstotliwościowa przebiegów doziemnych w uzwojeniu transformatora 110 kV w zakresie częstotliwości od 20 Hz do 2,5 MHz: a) przebieg dla czterech pozycji wzdłuż uzwojenia; b) rozkład przestrzenno-częstotliwościowy;

1 – $x/l = 1$; 2 – $x/l = 0,7$; 3 – $x/l = 0,5$; 4 – $x/l = 0,3$

Źródło: Florkowski i Furgał (2013)

Przebiegi przenoszone do innych uzwojeń mogą stanowić zagrożenie dla ich układów izolacyjnych. W wyniku badań przedstawiono metodę wyznaczania częstotliwości przebiegów zewnętrznych stanowiących źródło przebiegów rezonansowych wewnątrz uzwojeń transformatorów (Florkowski i in. 2015c, 2016c).

Zaawansowana tematyka propagacji przebiegów dotyczy także wykonywanych analiz i symulacji w topologiach rozgałęzionych sieci DC (*Meshed HVDC Grids*) (Florkowski i in. 2021). Tematyka ta wpisuje się w obszar koordynacji izolacji mający wieloletnią tradycję w badaniach prowadzonych w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki.

3. Podsumowanie

Reasumując, prace naukowo-badawcze prowadzone przez Zespół Inżynierii Wysokich Napięć dotyczą podstawowych problemów elektroenergetyki i mają zasadnicze znaczenie dla zwiększenia niezawodności pracy urządzeń elektroenergetycznych. Problematyka badań obejmuje zagadnienia z zakresu diagnostyki układów izolacyjnych, badań materiałów dielektrycznych do konstrukcji urządzeń na różnych poziomach napięciowych, przyczyn i skutków narażeń eksploatacyjnych. Prace badawcze są kontynuacją badań prowadzonych w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH od 70 lat w różnych obszarach elektroenergetyki we współpracy z przemysłem i ośrodkami naukowo-badawczymi, krajowymi i zagranicznymi. Wyniki prowadzonych prac naukowych są treścią licznych artykułów publikowanych w prestiżowych specjalistycznych czasopismach o zasięgu światowym.

Literatura

- Flisowski Z., Mazzetti C., Włodek R., 2002, *A procedure to ensure optimally effective lightning protection of structures*, [w:] *ICLP 2002: 26th International Conference on Lightning Protection: Cracow, Poland 2nd–6th September 2002: conference proceedings*, Vol. 2, Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Kraków, s. 827–832.
- Florkowska B., 1967, *Badania wyładowań częściowych w izolacji papierowo-olejowej kabli elektroenergetycznych metodą analizy impulsów napięciowych*, AGH, Kraków [rozprawa doktorska].
- Florkowska B., 1997, *Wyładowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia – analiza mechanizmów, form i obrazów*, Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa.
- Florkowska B., 2016, *Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Florkowska B., Furgał J., 2017, *Technika wysokich napięć*, Wydawnictwa AGH, Kraków.

- Florkowska B., Gacek R., Włodek R., 1975, *Technika rejestracji wyładowań niezupełnych za pomocą analizatorów wielokanałowych i zastosowanie ETO do opracowania wyników*, [w:] *Symposium: problemy wyładowań niezupełnych w układach elektroizolacyjnych Zakopane, czerwiec 1975*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Kraków, s. 101–110.
- Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydroń P., 2001, *Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*, Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa.
- Florkowska B., Florkowski M., Roehrich J., Zydroń P., 2011, *Measurement and analysis of surface partial discharges at semi-square voltage waveforms*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no. 4, s. 990–996.
- Florkowska B., Florkowski M., Furgał J., Roehrich J., Zydroń P., 2012a, *Impact of fast transient phenomena on electrical insulation systems*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Florkowska B., Florkowski M., Roehrich J., Rybak A., Zydroń P., 2012b, *Interaction of conductor with polymeric materials (XLPE/EPR) at partial discharges*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, no. 6, s. 2119–2127.
- Florkowska B., Włodek R., Florkowski M., Kuniewski M., 2020, *Wysokie napięcie w elektroenergetyce: wybrane zagadnienia i obliczenia*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Florkowski M., 2020a, *Partial discharges in high-voltage insulating systems: mechanisms, processing, and analytics*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Florkowski M., 2020b, *Influence of insulating material properties on partial discharges at DC voltage*, Energies, vol. 13, 4305. <https://doi.org/10.3390/en13174305>.
- Florkowski M., 2020c, *Classification of partial discharge images using deep convolutional neural networks*, Energies, vol. 13, 5496. <https://doi.org/10.3390/en13205496>.
- Florkowski M., 2021a, *Autonomous tracking of partial discharge pattern evolution based on optical flow*, Measurement, vol. 179, 109513. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109513>.
- Florkowski M., 2021b, *Imaging and simulations of positive surface and airborne streamers adjacent to dielectric material*, Measurement, vol. 186, 110170. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110170>.
- Florkowski M., Florkowska B., 2007, *Wavelet based partial discharge image denoising*, IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 1, no. 2, s. 340–347. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20060125>.
- Florkowski M., Furgał J., 2003 *Detection of transformer winding deformations based on the transfer function – measurements and simulations*, Measurement Science and Technology, vol. 14, no. 11, s. 1986–1992. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/11/017>.
- Florkowski M., Furgał J., 2004, *Detection of winding faults in electrical machines using frequency response analysis method*, Measurement Science and Technology, vol. 15, no. 10, s. 2067–2074. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/10/017>.

- Florkowski M., Furgał J., 2013, *High frequency methods for condition assessment of transformers and electrical machines*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Florkowski M., Kuniewski M., 2022, *Measurement of sprinkled and encapsulated space charge in homo-multilayer dielectric samples using PEA method*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, vol. 70, no. 2, e140686. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2022.140686>.
- Florkowski M., Furgał J., Pająk P., 2012, *Analysis of fast transient voltage distributions in transformer windings under different insulation conditions*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, no. 6, s. 1991–1998.
- Florkowski M., Florkowska B., Furgał J., Zydrón P., 2013, *Impact of high voltage harmonics on interpretation of partial discharge patterns*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, no. 6, s. 2009–2016.
- Florkowski M., Florkowska B., Zydrón P., 2015a, *Chopped partial discharge sequence*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 6, s. 3451–3458.
- Florkowski M., Florkowska B., Rybak A., Zydrón P., 2015b, *Migration effects at conductor/ XLPE interface subjected to partial discharges at different electrical stresses*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 1, s. 456–462.
- Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M., 2015c, *Propagation of overvoltages in distribution transformers with silicon steel and amorphous cores*, IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, no. 16, s. 2736–2742. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0395>.
- Florkowski M., Florkowska B., Zydrón P., 2016a, *Partial discharge echo obtained by chopped sequence*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 3, s. 1294–1302. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005487>.
- Florkowski M., Florkowska B., Zydrón P., 2016b, *Partial discharge forms for DC insulating systems at higher air pressure*, IET Science, Measurement & Technology, vol. 10, no. 2, s. 150–157. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2015.0179>.
- Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M., 2016c, *Propagation of overvoltages transferred through distribution transformers in electric networks*, IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 10, s. 2531–2537. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1500>.
- Florkowski M., Florkowska B., Włodek R., 2017, *Investigations on post partial discharge charge decay in void using chopped sequence*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 6, s. 3831–3838. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006625>.

- Florkowski M., Florkowska B., Kuniewski M., Zydroń P., 2018, *Mapping of discharge channels in Void creating effective partial discharge area*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 25, no. 6, s. 2220–2228. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007426>.
- Florkowski M., Kuniewski M., Zydroń P., 2020a, *Partial discharges in HVDC insulation with superimposed AC harmonics*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 27, no. 6, s. 1875–1882. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2020.008966>.
- Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M., 2020b, *Propagation of overvoltages in the form of impulse, chopped and oscillating waveforms in transformer windings – time and frequency domain approach*, Energies, vol. 13, 304. <https://doi.org/10.3390/en13020304>.
- Florkowski M., Krześniak D., Kuniewski M., Zydroń P., 2020c, *Partial discharge imaging correlated with phase-resolved patterns in non-uniform electric fields with various dielectric barrier materials*, Energies, vol. 13, 2676. <https://doi.org/10.3390/en13112676>.
- Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M., 2021, *Meshed HVDC lightning impulse over-voltage propagation in HVDC meshed grid*, Energies, vol. 14, 3047. <https://doi.org/10.3390/en14113047>.
- Furgał J., 2003, *Analiza narażeń przepięciowych izolacji transformatora chronionego iskiernikami i beziskiernikowymi ogranicznikami przepięć*, Rozprawy Monograficzne, nr 118, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Furgał J., 2009, *Analysis of overvoltages in windings of power transformers protected by use of metal oxide surge arresters*, European Transactions on Electrical Power, vol. 19, no. 3, s. 400–410. <https://doi.org/10.1002/etep.227>.
- Furgał J., 2020, *Influence of lightning current model on simulations of overvoltages in high voltage overhead transmission systems*, Energies, vol. 13, no. 2, 296. <https://doi.org/10.3390/en13020296>.
- Furgał J., Kuniewski M., Pająk P., 2020, *Analysis of internal overvoltages in transformer windings during transients in electrical networks*, Energies, vol. 13, no. 10, 2644. <https://doi.org/10.3390/en13102644>.
- Kuniewski M., 2020, *FRA diagnostics measurement of winding deformation in model single-phase transformers made with silicon-steel, amorphous and nanocrystalline magnetic cores*, Energies, vol. 13, no. 10, 2424. <https://doi.org/10.3390/en13102424>.
- Włodek R., 1992, *Mechanizmy działania wyładowań niezupełnych w dielektrykach*, Postępy Techniki Wysokich Napięć, z. 20, Komitet Elektrotechniki PAN, Warszawa.
- Zydroń P., 2011, *Sygnały probiercze i pomiarowe w technice wysokich napięć i diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych*, Rozprawy Monograficzne, nr 233, Wydawnictwa AGH, Kraków.

- Zydroń P., Bonk M., Roehrich J., Mikrut P., Szafraniak B., 2018, *Application of the extended phase-resolved PD patterns for analysis of PD activity in epoxy resin insulation*, [w:] *PAEE 2018: Progress in Applied Electrical Engineering: Kościelisko (Zakopane), June 18–22, 2018*, IEEE, Piscataway, s. 1–4. <https://doi.org/10.1109/PAEE.2018.8441077>.
- Zydroń P., Bonk M., Roehrich J., Mikrut P., 2019, *Observation of electrical treeing processes in silicon insulation samples using of transformed PD phase-resolved patterns*, [w:] *PAEE 2019: Progress in Applied Electrical Engineering: Kościelisko (Zakopane), June 17–21, 2019*, IEEE, Piscataway, s. 1–4. <https://doi.org/10.1109/PAEE.2019.8788999>.